

南极冰盖15万年的气候记录

C. 洛里斯等

第四纪经历了若干次冰期和间冰期。自首次在格陵兰西北部世纪营地打钻提取冰岩芯以来,又先后在南极洲伯德站、东方站、多姆C和格陵兰的戴依3四个地点打了五个穿透末次冰期层位的深钻孔。对这些冰岩芯中稳定同位素氧18含量及冰内杂质的化学成份分析研究结果,为地球的古气候及古环境提供了极为珍贵的资料。

在这些冰岩芯中,似乎世纪营地冰岩芯的底部可以抵达末次间冰期。最近根据冰岩芯和深海沉积物岩芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面的对比,可以间接推算出冰岩芯的年代,提出一个新的世纪营地时间尺度,证实了末次间冰期的存在。据此,又证实了戴依3冰岩芯的底部可能也是末次间冰期的。加拿大德温岛的穿透了薄冰帽的冰岩芯,可能也和世纪营地的时间序列相当。

苏联南极考察队在东方站取得的一支2083米长冰岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果,又确定了一个新的气候—时间序列。这支岩芯取自极地高原内部,该地冰厚约为3700米,氧同位素剖面复盖的时间为距今约15万年,超越了末次间冰期,且基本上未受冰体流动的干扰。

东方站冰岩芯 南极苏联的东方站($78^{\circ}28'S$, $106^{\circ}48'E$),海拔3488米。据核爆炸造成的 β 活化度和物质平衡花观测,测得现代积累量为 $2.2-2.5$ 克·厘米 $^{-2}$ 年 $^{-1}$ 。

第一阶段,1970—1974年间,成功地钻到950米深,这段冰岩芯包含了全新世和部分末次冰期的冰体。第二期打钻于1980年开始,打到2083米深。 $\delta^{18}\text{O}$ 测量到1412米,该深度的年代估计距今11万5千年。

自1982年起,苏联和法国的科学家们就这一新的2083米冰岩芯进行了合作研究。其中,1982—1983年南半球夏季的野外工作是采样,大批冰岩芯被送往法国格伦诺布尔。目前,分析工作分别在苏联和法国进行,其中包括杂质的化学成份和 CO_2 在内的气泡的气体成份分析。

$\delta^{18}\text{O}$ 剖面 用于同位素分析的样品是在野外沿冰岩芯延伸方向连续切得的冰体。全部样品都测量了 $\delta^{18}\text{O}$ 和氡的含量。这里仅讨论 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量结果。图1为 $\delta^{18}\text{O}$ —深度曲线图,精度为 $\pm 0.15\%$ 。(相对于SMOW)。其中有两段与非连续的样本完全重合,并算出了他们的平均值。为便于讨论,用一条线将点子连结起来。在两段重叠部份里,连续和非连续采样的测量结果都很一致,说明了每25米取一个样品对于获得可靠的古气候资料已足够。另一方面,目前的资料还不足以证明,戴依3冰岩芯所提示的南半球在距今3万至4万年之间环境有突变的说法。从表面直到1460米处, $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(图1)的基本特点和早先发表的东方站 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面很相似,末次间冰期冰期的冰体出现在深度约400米附近,而且冰期和冰后期的 $\delta^{18}\text{O}$ 之差约为5%。但是,这里存在一个比现代值低约3‰的系统误差。

这里的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面提出了一个自前一次冰期末开始的末次冰期气候循环模式,尤其是可以详细研究在约1825米处 $\delta^{18}\text{O}$ 达到最高值的末次间冰期。从岩芯顶部起向下连续划分出若干冷、暖阶段。剖面中最典型的特点是四个非常显著的冷期,即425米,975米,1525米,2050米,其共同点是 $\delta^{18}\text{O}$ 值都在 -62% 左右,图1已对这些冷期做了简单描述。从岩芯的顶部开始,暖期(涂色部份)为A、C、E和G,冷期为B、D、F和H。阶段A和G的同位素富集值最高,分别为 -57% 和 -55% 。由图1中的实线,在17900米阶段G中,可见到明显的同位素跃迁值(约2%)。阶段E和G则为介于冰盛期和间冰期条件之间的相对较暖的间冰段。

已确定下来的各阶段年代如图1上部所示。阶段A为现代全新世。阶段B到F复盖了整个末次冰期。阶段G包括了末次间冰期最盛,阶段H则为末次冰期前一次冰期的最末一部份。

冰岩芯年代学 近年来,包括同位素和化学地层学以及流动模式在内的诸多手段,均被用来确定东方

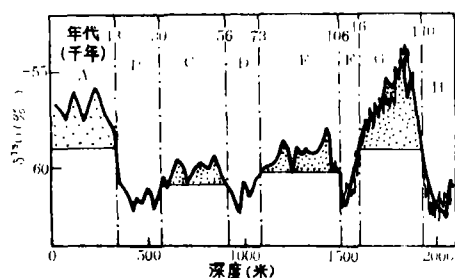


图1 东方站冰岩芯中稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和深度间的关系。粗实线是据非连续资料所绘（每25米采一个样），细实线系据1400米和2083米之间连续采样绘制。

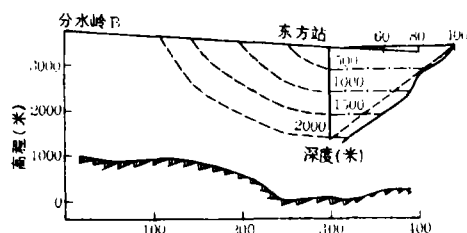


图2 沿着分水岭B—东方站轴线的表面和基岩地形（下面的曲线）；减薄函数（图的右上角），它被表示为初始厚度的百分数，其中实线为考虑了地貌形态的厚度函数，虚线没有考虑地貌形态

站冰岩芯的年龄。为了建立时间尺度，这里使用了与其它古气候条件无关的冰体流动模式。这种确定时代的方法必须解决两个问题。其一，必须确定各深度的原始积累区当时的积累速率 $A_{(z)}$ 。其二，计算出减薄函数。

为了估算过去的积累速率，采用了南极高原现代降水速率与表面温度紧密相关这一实测结果。首先，根据洛里斯等的剖面估算出降水形成时的温度 T_f 。其二，用积累速率的现代值 $A_{(0)}$ 乘以饱和蒸汽压对 $T_{f(0)}$ （现代条件下）的微商之比，计算积累速率 $A_{(z)}$ 。这个公式来源于简化了的一维模式，它忽略了降水区域上部大气环流强度的变化等因素。

东南极洲的冰体流线大致呈平行状，二维冰川学模式非常适用于东方站地区。在使用卢鲍特里（Lliboutry）的解析模式时，必须考虑到钻孔处上游冰体厚度的变化。在估算冰岩芯的年代时，使用了迭代过程。

为了说明基岩地形的影响，图2展示了考虑了地形影响的减薄函数（实线）和不考虑地形影响的减薄函数（虚线）。结果表明，在500—1000米深度之间，基岩地形有明显的作用。鉴于此，整个气候循环中物质连续性所计算的平均值可近似地代表冰体的运动速度。

图3介绍了三种现代物质积累量的结果，年积累量明显地与 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面相关， $\delta^{18}\text{O}$ 的低值对应冰期。

根据现有资料，现代积累速率可取平均值 $2.3 \text{ 克} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ ，用这一平均值计算出1112米处的年龄为距今约9万8千年，比以前估算的11万5千年小。岩芯底部约为距今16万年。

古气候资料 极地雪中同位素含量主要由 T_f 控制，但也依赖其它一些参数，如气体的分布区域和动力学历史，以及雪形成的微观物理过程等。重建全部降水和水蒸气中同位素含量时空变化的方法，是在大气循环模式（GCM）中建立同位素周期。在找到新的研究方法之前，判断气候条件必须以现代降水和同位素模式中观察到的 $\delta^{18}\text{O}$ ——温度关系为标准，这些现代观测结果仅仅提供了一个气体介质动力学历史的简单梗概。

虽然仍有局限性，但采用这两种方法的优点确信可以估算出冰期—间冰期演变主要过程中的温度变化。在东南极洲中心地区，这一点尤为突出。第一， $\delta^{18}\text{O}$ ——温度之间呈良好的线性关系（在 -20°C 到 -55°C 之间，相关系数为0.989），其斜率可用近期推导出的动力学同位素模式做出合理解释。第二，冰体厚度变动很小，而且原生冰确实经过了再次变动。由于把 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面变换成温度剖面后所推导出的积累变化与由 ^{10}Be 所推导出来的完全一致，所以重建东方站冰岩芯中的温度剖面就更有把握。

校正了海水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化后，就可以重建温度剖面。据此，冰期—间冰期时冰盖表面温度在H—G交界约相差 10°C 左右（ $\delta^{18}\text{O}$ 值相差6.5‰），B—A交界处为 8°C （ $\delta^{18}\text{O}$ 值相差5‰），C和E间冰段时则分别约为 2°C 和 4°C ，比冰盛期为暖，其余四个冷期H，F，D和B的温差不超过 1°C 。末次间

冰期的峰值表明当时气候比全新世暖。温差估计为3℃左右, 其中的1℃是因为间冰期的冰在内陆100公里形成这一因素造成(图2)。上述全部值均未考虑冰盖表面高程变化可能引起的温度变化。如果必要的话, 可以根据目前正在研究的气体总含量来校正。目前的资料表明, 氧同位素基本上能反映古气候条件。这一古气候条件曾被某些试图在考虑的时间尺度内证实东南极冰盖相对稳定性的研究单独予以确证。

与其他极地冰岩芯的对比 关于末次冰期冰盛(距今约18000年)和全新世(图1中的B—A)之间的转折部, 在东南极洲的两个地点相当吻合, 即在多姆C末次冰期冰盛和全新世之间 $\delta^{18}\text{O}$ 之差为5.4‰(未校正), 东方站约为5‰, 均略低于西南极洲伯德站值(差值为7‰)。推算出的南极洲末次冰期冰盛期和全新世之间的温差约为8—10℃。

在间冰期最盛和随后 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现极小值所代表的时间的丢失现象, 东方站冰岩芯中比世纪营地的多两次。严格地讲, 这并不是冰岩芯的特征, 因为世纪营地冰岩芯的时间尺度是从将其与深海沉积物记录的对比中推算出来的。这说明用间接年代确定法是有许多困难的。

与深海沉积物岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面的对比 一般认为, 深水区有孔虫目的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要反映冰量的变化。虽然许多因素干扰了这个关系, 但是CLIMAP的专家们指出, 并不存在足以否定同位素同步性的一级近似的证据, 或否定反映冰体体积的真实性。虽然在细节上有差异, 但所有的冰岩芯都得出一个颇为相似的总趋势, 从而为同位素地层学奠定了共同的基础。值得注意的时期包括Emiliant的1—6阶段, 如图4e所示, 阶段5又被划分成5a到5e。

采用东方站的年代序列, 可看到阶段1~4和东方站的A—D阶段对应良好。阶段E包括了5a—5c, 而阶段F对应5d。但是, 分别代表深海沉积物和冰岩芯中记录到的末次间冰期的阶段5e和G的关系不清晰(图4)。在这两个阶段中有一个重要差别, 即5e持续了1万1千年, 而G为2万4千年。此外, 末次间冰期最盛期在东方站岩芯中约距今13万年, 反之, 深海岩芯记载的冰盖体积最小的时代却比较早, 距今约12万年。

此间物质积累速率的成倍增加, 在阶段5e和阶段G之间对应良好。虽然不能完全排除这种可能, 但尚未有足够的证据表明降水方式发生了明显的变化。正如南半球海洋温度和冰量记录观测所表明的那样, 两个峰值之间确实存在时间滞后(约3千年左右), 但是年代划分的不可靠性妨碍了对时间滞后问题的进一步讨论。另一方面, 阶段G可能一直延续到阶段5e以后这一事实, 是深入认识末次间冰期气候和末次冰期初始阶段的关键。最近关于冰岩芯内所含气体的 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量结果, 有可能得到将深海沉积物岩芯和冰岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面联系起来的方法, 然后再估算时间。

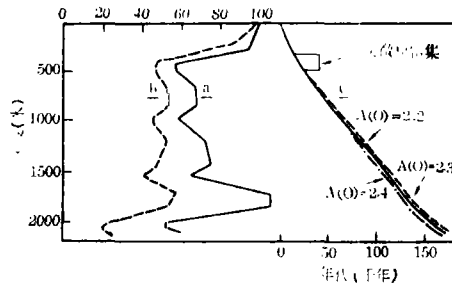


图3 a 各年层的初始厚度;
b 岩芯中这些年层的厚度。
c 不同 $A(O)$, (单位: $\text{g cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) 值的深度 —— 年代关系曲线。

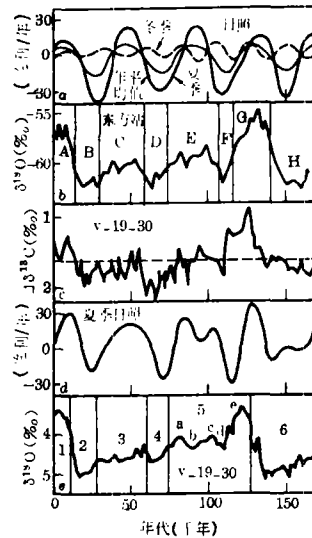


图4 各种参数值随时间的变化:
a 南纬80度处冬、夏季和年日照量;
b 东方站冰岩芯中 $\delta^{18}\text{O}$;
c V19—30 深海沉积物岩芯内 $\Delta\delta^{13}\text{C}$;
d 南纬65度处夏季日照量;
e V19—30 深海沉积物岩芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 。

据CLIMAP研究,末次间冰期和现代气候颇为相似,当时的气候比现代为暖。东方站冰岩芯的结果指出,末次间冰期时整个南极洲的气候较为温暖。另外,东方站冰岩芯的记录并未指出阶段5c具有间冰段的特征,所以曾有过东南极冰盖冰体在距今9万5千年前后发生过跃动的观点。

尽管深海沉积物岩芯中的冰期组合(图4e)连续给出了一个不对称的锯齿状冰量循环特征,然而冰岩芯记录(图4b)表明在冷阶段(H、F、D和B)中最低温度仍为同一个量级。这一点可把大气圈的快速反应与控制因素和反馈效应联系起来,而且说明在冷阶段之间有一个非常稳定的气候模式。

控制因素和反馈因素 除了东南极洲气候的重建工作,还要讨论可能控制该地区气候的若干重要因素,以及东南极洲气候如何影响全球气候、包括研究日照、大气中 CO_2 含量及全球冰量等的变化可能起到的作用。

日照的变化 近年来,认为地球轨道变化是更新世冰期发生的主要原因的米兰科维奇(Milankovitch)理论得到更多的支持,而且促使许多学者去建立数学模式。做为一种间接记录,据统计理论和谱分析已经提出若干种周期,如动进周期(1万9千年和2万3千年),倾斜周期(4万1千年)和离心周期(10万年)等。

冰岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面(图4b)与 80°S 地区年日照曲线(图4a)的比较,说明同位素所示的冰暖阶段和日照曲线的最小、最大值之间有密切关系。

从以前在高纬地区获得的若干深海岩芯得知,倾斜周期是非常重要的,它表明在一个局部时间尺度范围内,轨道因素确实起了作用。 80°S 处年日照的最大变化约为7%,据辐射平衡方程,该值对应的温度直接效应为 4°C 。

由于承认南半球气候过程中的轨道因素作用,所以冰岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中存在约4万年周期这一事实间接地支持了东方站冰岩芯的时代划分。

大气中 CO_2 的富集 格陵兰和南极许多冰岩芯中冰内气泡 CO_2 含量的测量表明, CO_2 含量的变化与气候变化有关。 CO_2 含量有可能测出过去约4万年的历史, CO_2 含量在末次冰期最盛和工业化之前的全新世时期相比增加约40%。这些结果表明 CO_2 及其造成的温室效应有可能是冰期的控制因素,也可能是南北两半球之间同步性的原因。

沙克尔顿等指出海洋表面和深海海水中碳同位素比率的差异随 CO_2 水准而变化,因而提出大气圈中 CO_2 的含量可以推算过去的时间序列这一间接方法。他们从浮游生物和底栖有孔虫目之间 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值($\Delta\delta^{13}\text{C}$)估算出了海洋表层和底层之间 $\delta^{13}\text{C}$ 比率这一参数。所估算的 CO_2 含量与极地冰岩芯记录,在它们公共部分(4万年前)完全一致。这证明了上述研究方法是正确的。目前正在进行一项旨在取得东方站冰岩芯中 CO_2 的精细剖面,以便直接把过去15万年中 CO_2 与气候变迁联系起来的研究工作,以下我们将把 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 的曲线看成 CO_2 曲线进行讨论。

图4c表明了 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 记录中的第一个15万年。可看到该曲线与东方站 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线十分相似。我们的目的仍是期望得知 CO_2 含量和大气圈温度之间究竟有什么关系。气候模式表明, CO_2 的温室效应在高纬地区,特别是冰复盖区尤为显著。据斯托夫勒等研究,高纬地区 CO_2 含量的变化达到40%时,对应的温度将升高 $2-4.5^\circ\text{C}$ 。

在 CO_2 ——气候关系中还有其他若干特征。多姆C冰岩芯中 CO_2 的测量表明,南半球高纬地区气候变化中, CO_2 富集程度的增加与末次冰期终末阶段开始之前,或同时有关。另一方面,据 CO_2 重建的34万年曲线,皮赛厄斯和沙克尔顿推断, CO_2 滞后于运行轨道的影响,先于冰体体积的变化,平均滞后为2千5百年。据此提出了两点:(1) CO_2 不是气候变化的结果,它是因地球轨道变化导致气候变化结果的一部分;(2)一个显著的倾斜分量的存在意味着,纬度的高低控制着 CO_2 对地球运行轨道因素的响应。

冰量的反馈作用 以上讨论虽然包括许多假设,但说明了日照量和大气圈中 CO_2 的含量可能是确定过去15万年南极洲气候的若干方法中的两种。但是,只有两个因素不能解释在东方站 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中看到的全部气候变化情况。特别是,我们看到非常寒冷的阶段F却对应着 CO_2 的居中,即不冷又不暖的天气条件。

注意到阶段F 对应着65° N (图4d) 日照较低这一事实(此外, 在过去15万年期间, 这一低日照曲线和东方站冰岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录(图4b)非常相似)。极地冰盖扩张和退缩的模式表明, 北半球高纬地区, 冰量变化受夏季辐射的控制。如图4d所示, 冰盖体积的扩张, 对应着低日照; 反之, 冰盖体积的缩小, 对应着强日照。这样推导出的冰量曲线和从底栖有孔虫目(图4e)中推算得到的冰量不同, 已特别注意到阶段F期间的差别。据巴德的研究, 如果考虑到南极冰盖冰体中含量甚微的 ^{18}O 的作用和意义, 那么推算冰量的两种研究可能是一致的。这便提出了另一个问题, 即北半球冰体的扩张对南极洲气候影响究竟有多大。

这里, 我们显然无法回答这个问题, 但是GCM近期研究结果表明这个关系是不能通过大气圈中大气层内部热交换来解释。这可能涉及到另外一些机制, 如海洋循环中穿越赤道时热交换的变化, 或者东南极洲冰盖对海平面变化的响应。如果象巴德提出的那样, 南半球海冰和北半球冰量的对比在时间上的矛盾能够解决的话, 则第二个假想是唯一正确的。

结语 已获得末次气候循环的深钻冰岩芯中第一个完整、清晰的同位素剖面, 2083米之长的东方站冰岩芯可追溯到距今15万年的前一次冰期最后一个阶段。把仅代表冰盖前半部分的冰岩芯记录的冰川模式与由同位素估算的过去积累速率结合起来, 可以得到时间尺度。虽然该方法有其本身的局限性, 但它独立于其它鉴别古气候、或气候条件的方法。

东南极洲 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录主要用来论证温度的变化。这个方法的根据是现代降水中观测到的 $\delta^{18}\text{O}$ ——温度梯度关系和简化了的动力学同位素模式。很有必要用GCM得到更精确的大气圈 $\delta^{18}\text{O}$ 循环模式, 相信本文的温度描述已涉及到 $\delta^{18}\text{O}$ 的主要变化因素。东方站冰岩芯的记录提供了许多气候资料。现代全新世之前有一长时期的冰期, 该冰期之间又夹有两个明显的间冰段。意味深长的是, 明显表现出来末次间冰期比现代全新世暖的特点, 末次间冰期之前的那次冰期的最末一个阶段又和末次冰期冰盛时的温度相当接近。

与深海沉积物中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比表明, 南极洲的气候和全球冰量演化方式不同。南极洲温度记录中出现的末次间冰期, 约比冰量记录中出现的末次间冰期长一倍。此外, 末次冰期期间, 上述两种记录的形式明显不同。这样便得到另一不同的、但却是相互补充的复盖整个末次气候循环的气候记录。

东方站岩芯中存在约4万年的周期, 有力地证明了地球轨道变化是气候变化的决定因素。这一记录和80° S的年日照相位相同, 说明轨道因素在区域尺度内是有影响的。气候曲线和65° N夏季日照之间有许多共同点, 而65° N的夏季日照可能是北半球冰盖对南极气候影响的结果。

沙克尔顿及其合作者的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 曲线和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录之间有一些令人注目的相似之处。这里仍然沿用原作者将 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 曲线当作 CO_2 曲线的方法, 在整个气候循环中, 大气圈中 CO_2 含量和大气圈中温度之间如同以前所述及的在过去4万年中有一定联系。

有许多其它方法可以从东方站冰岩芯中得到比本文述及的 $\delta^{18}\text{O}$ 方法所获得的更多的气候资料。已经从 ^{10}Be 中得到了一些饶有兴趣的结果, 而其它若干研究或者正在进展之中, 或者计划在不久的将来进行。他们包括有氦和氧18的测定, 气体总量的测量, 冰晶尺寸, 气泡中的 CO_2 , 气体中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比率和悬浮微粒含量等等。

王文梯、秦大河节译自《Nature》, Vol. 316(5), 1985